

# Совершенствование методов эколого-экономической оценки процессов добычи и переработки железной руды корпораций арктической зоны России на основе математического моделирования

С.В. Тишков<sup>1</sup>✉, А.Д. Волков<sup>1</sup>, К.А. Кулаков<sup>2</sup>, В.В. Щипцов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт экономики Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Институт геологии Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Российская Федерация

✉nsteco\_85@mail.ru

**Резюме:** Железорудные производства традиционно выполняют важнейшую функцию в обеспечении мировой обрабатывающей промышленности сырьем и полуфабрикатами, играют важнейшую роль в социально-экономическом развитии регионов Севера России. Одним из ключевых вопросов эксплуатации месторождений остается текущий, накопленный и потенциальный экологический ущерб для территорий нахождения, связанный с накоплением отходов первичной обработки сырья, складированных в хвостохранилищах. Развитие технологий извлечения сырья позволяет увеличить временной горизонт эксплуатации месторождений, но требует мер по увеличению емкости хвостохранилища, модернизации обслуживающих его гидротехнических сооружений. В статье на основе прогнозных данных о развитии сооружений хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш» до 2043 г. построена модель расчета заполняемости отстойного пруда хвостохранилища в случае прорыва новой дамбы. В настоящий момент на предприятии в рамках развития сооружений хвостового хозяйства выполняется организация строительства хвостохранилища на месте намывного пляжа. Одной из основ принятия решений является оценка рисков, включающих в себя оценку аварийных ситуаций. Рассматриваются два сценария развития аварий на ГТС: потеря статической устойчивости дамбы, т.е. прорыв стенки дамбы в ходе нормальной эксплуатации (А1), и размыв тела дамбы в результате перелива воды через гребень, т.е. перелив воды через верх дамбы с последующим разрушением стенки (А2). Выполнены оценка вместимости нового и старого хвостохранилищ (отстойного пруда) и пропускной способности новых и старых гидротехнических сооружений и анализ возможности использования отстойного пруда и системы водосбросных сооружений в зависимости от степени постройки хвостохранилища. Сделан вывод о необходимых мерах по совершенствованию системы для локализации техногенных аварий по различным сценариям.

**Ключевые слова:** горнодобывающее предприятие, модель аварии, хвостохранилище, ресурсная база, АО «Карельский окатыш», размыв дамбы

**Благодарности:** Статья подготовлена в рамках государственного задания ФИЦ Карельский научный центр РАН «Комплексное исследование и разработка основ управления устойчивым развитием северного и приграничного поясов России в контексте глобальных вызовов».

**Для цитирования:** Тишков С.В., Волков А.Д., Кулаков К.А., Щипцов В.В. Совершенствование методов эколого-экономической оценки процессов добычи и переработки железной руды корпораций арктической зоны России на основе математического моделирования. *Горная промышленность*. 2022;(2):112–119. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-112-119>

## Improvement of environmental and economic assessment methods of mining and processing of iron ore by corporations of the Arctic zone of the Russian Federation based on mathematical modeling

S.V. Tishkov<sup>1</sup>✉, A.D. Volkov<sup>1</sup>, K.A. Kulakov<sup>2</sup>, V.V. Shchiptsov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Economics, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

✉nsteco\_85@mail.ru

**Abstract:** Iron ore production traditionally performs an important function in providing the world's manufacturing industry with raw materials and semi-finished products, and plays an important role in the socio-economic development of the regions of the North of Russia. One of the key issues of field operation remains the current, accumulated and potential environmental damage to the territories of location associated with the accumulation of waste from primary processing of raw materials stored in tailings. The development of raw material extraction technologies makes it possible to increase the time horizon for the exploitation of

deposits, but requires measures to increase the capacity of the tailings storage facility, modernization of hydraulic structures serving it. In the article, on the basis of forecast data on the development of tailings facilities of the 'Karelsky Okatysh' JSC for the period up to 2043, a model for calculating the occupancy of a tailings pond in the event of a new dam break is constructed. At the moment, within the framework of the development of tailings facilities at the specified enterprise, the organization of the construction of a tailings dump on the site of an alluvial beach is being carried out. One of the bases of decision-making is risk assessment, which includes an assessment of emergency situations. 2 scenarios of accidents at the GTS are considered: the loss of static stability of the dam, i.e. the break of the dam wall during normal operation (A1) and the erosion of the body of the dam as a result of the overflow of water over the crest, i.e. the overflow of water over the top of the dam with subsequent destruction of the wall (A2). The assessment of the capacity of the new and old tailings dam (settling pond) and the capacity of new and old hydraulic structures and the analysis of the possibility of using a settling pond and a system of spillway structures, depending on the degree of construction of the tailings pond. The conclusion is made about the necessary measures to improve this system for the localization of man-made accidents in various scenarios.

**Keywords:** mining enterprise, accident model, tailings storage, resource base, the 'Karelsky Okatysh' JSC, dam erosion

**Acknowledgments:** The article was prepared within the framework of the state assignment of the Karelian Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences "Integrated research and development of the management bases for sustainable development of the northern and frontier belts of Russia in the context of global challenges".

**For citation:** Tishkov C.V., Volkov A.D., Kulakov K.A., Shchiptsov V.V. Improvement of environmental and economic assessment methods of mining and processing of iron ore by corporations of the Arctic zone of the Russian Federation based on mathematical modeling. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):112–119. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-112-119>

## Введение

Железорудное производство охватывает более чем 40 стран мира, но крупнейшие запасы железорудного сырья, как и совокупная доля в выпуске товарной железорудной продукции, принадлежат Австралии, Бразилии, Китаю, Индии и России [1]. Это отражено на рис. 1.



**Рис. 1**  
Ранжирование площадей с различным производством железной руды (тыс. т)

Источник: [1]

**Fig. 1**  
Ranking of areas with different iron ore production (in thousand tons)

Source: [1]

В 2020 г. цена железной руды составила в \$84,73 за тонну по сравнению с минимумом в \$76,16 за тонну в январе 2019 г. Сохраняется тенденция роста в связи с сокращением предложения железорудной продукции более высокого качества. Например, в Бразилии были закрыты заводы по производству окатышей. Одна из компаний в Бразилии снизила продажу окатышей в 2020 г. на 25–30 млн т. Статистические данные по Бразилии свидетельствуют о том, что в 2019 г. было произведено 302 млн т железной руды, что меньше, чем 385 млн т в 2018 г. Важнейшей причиной данного спада стало обрушение стенок дамбы хвостохранилища, которое привело к остановке одного из крупнейших производств страны. В целом, в 2020 г. производство железной руды в мире несколько снизилось по

сравнению с 2019 г. По данным Всемирной ассоциации производителей стали, мировое потребление готового проката снизилось на 2,4% в 2020 г., но увеличится по прогнозам на 4,1% в 2021 г., что подтверждается реальными показателями<sup>1</sup>.

В европейской части Арктической зоны России локализовано несколько крупных железорудных предприятий, играющих ключевую роль в экономике регионов. Помимо компании «Ковдорский ГОК», добывающей апатит-магнетитовые руды щелочного базит-ультрабазитового комплекса палеозоя, непосредственно расположены две горнодобывающие компании (АО «Алкон» и АО «Карельский окатыш»), связанные с добычей и переработкой докембрийских железных руд метаморфогенного генезиса. Они входят в состав ПАО «Северсталь», мирового лидера черной металлургии.

Одним из ключевых вопросов эксплуатации месторождений железорудных производств остается текущий, накопленный и потенциальный экологический ущерб для территорий нахождения, связанный с накоплением отходов первичной обработки сырья, складированных в хвостохранилищах [2; 3]. Развитие технологий извлечения сырья позволяет увеличить временной горизонт эксплуатации месторождений, но также требует мер по увеличению емкости хвостохранилища, модернизации обслуживающих его гидротехнических сооружений, плотин, ограждающих и защитных дамб. При этом различные природные и географические условия и технические особенности эксплуатации определяют особенности возможных рисков и последствий их наступления [4–6]. Исследования показывают, что с течением времени аварии на гидротехнических сооружениях добывающих производств происходят все чаще [7]. В условиях Севера экологические риски, связанные с аварийными ситуациями, особенно сильны: с одной стороны, суровые и экстремальные климатические условия значительно усложняют эксплуатацию гидротехнических сооружений и выдвигают дополнительные требования к их проектированию, возведению

<sup>1</sup> Annual statistical report. Washington, DC: American Iron and Steel Institute; 2019. 115 p.

и эксплуатации [8], с другой – хрупкость северных экосистем не позволяет рассчитывать на их скорое восстановление в случае серьезного ущерба [9; 10]. Эти обстоятельства делают актуальной оценку рисков при различных сценариях аварий на гидротехнических сооружениях в условиях северных регионов. Ввиду особых угроз, связанных с эксплуатацией хвостохранилищ, для водных объектов и экосистем имеет актуальность и выбор объекта исследования – сооружения хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш», локализованного на севере Республики Карелия, крае озер и болот. В настоящий момент данное предприятие является крупным загрязнителем сточных вод, поступающих в бассейн Белого моря [11, с. 36]. Предотвращение чрезвычайных происшествий, связанных с экологическим ущербом для местных экосистем в зоне локализации предприятия и его гидротехнических сооружений, должно быть основано на расчетах сценариев наиболее вероятных аварийных ситуаций на объектах хранения отходов. Выявленные в результате проработки этих сценариев уязвимости в организации гидротехнических сооружений следует учесть в планируемых мероприятиях по развитию сооружений хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш».

**Особенности освоения, развития добычи и организации хранения отходов железорудными предприятиями в условиях Арктической зоны**

В период с 1921 по 1932 г. проводились поисково-разведочные работы в Заимандровском районе Монче-тундры, в результате которых были обнаружены магнетитовые кварциты Кировогорского месторождения. В 1949 г. началось строительство комбината, а двумя годами позже был заложен фундамент дробильно-обогащительной фабрики. В настоящее время современное АО «Олкон», расположено в городе Оленегорске Мурманской области. Сырьевая база самого северного арктического Заимандровского района представлена Оленегорским месторождением железных руд, включающим 7 карьеров (Оленегорский, Кировогорский, им. XV лет Октября и ряд других) [12]. Здесь преобладает открытый способ извлечения руды, а на Оленегорском карьере с 2005 г. идет отработка глубоких горизонтов комбинированным открыто-подземным способом. Для получения магнетитового концентрата из добытой руды с содержанием железа не менее 28% разработана и внедрена магнитная схема обогащения. В 1954 г. на обогащительной фабрике был получен железорудный концентрат. В дальнейшем АО «Олкон» разработал и внедрил получение вы-

сокочистого магнетитового концентрата с содержанием железа уже не менее 72% [13]. Объем добычи сырой руды и производство товарной продукции изменяется по годам, что иллюстрируется в табл. 1 по данным годовых отчетов.

Начало истории изучения Костомукшского железорудного района связано с аэромагнитной съемкой, проводившейся в 1945–1946 гг., с апробацией аэромагнитометра проф. А.А. Логачева, в результате которой были выявлены мощные железорудные толщи. Эти данные явились основанием для организации поисково-разведочных работ в этом районе. В 1974 г. был осуществлен технический проект строительства. На основе данного проекта Председатель СМ СССР А.Н. Косыгин и Президент Финляндской Республики Урхо К. Кекконен подписали договор о совместном строительстве первой очереди Костомукшского ГОКа и г. Костомукши в период 1977–1982 гг. В сентябре 1982 г. на Череповецкий горно-металлургический комбинат отправлен первый железнодорожный состав с железорудными окатышами. Сырьевая база Костомукшского месторождения представлена тремя участками (Северный, Центральный и Южный). Среднее содержание Feмагн составляет 27,1%. В 2008 г. получена лицензия на разведку и извлечение руд Корпангского месторождения. Корпангское месторождение расположено в 24 км северо-восточнее г. Костомукши [14–16]. По состоянию на 2021 г. здесь начата добыча руды на трех карьерах. Другим крупнейшим проектом является строительство АО «Карельский окатыш», рудно-вскрышного комплекса оборудования циклично-поточной технологии для Центрального участка карьера Костомукшского месторождения. Предприятие производит железорудные окатыши с содержанием железа 65–66,5%. Продукция поставляется как на внутренний рынок (основной потребитель – Череповецкий металлургический комбинат), так и на экспорт (в первую очередь в Финляндию). Объем добычи сырой руды и производство товарной продукции показаны в табл. 1.

Производимая АО «Олкон» и АО «Карельский окатыш» продукция соответствует мировым стандартам по физико-химическим и металлургическим свойствам. Добытая рудная масса транспортируется железнодорожным транспортом на дробильно-обогащительные фабрики в городах Оленегорске и Костомукше. Надо отметить, что статус резидентов Арктической зоны обеспечивает предприятию государственную поддержку проекта.

АО «Олкон» является крупным производителем щебня строительного, используемого в первую очередь в же-

**Таблица 1**  
Объем добычи сырой железной руды и производство товарной продукции, млн т

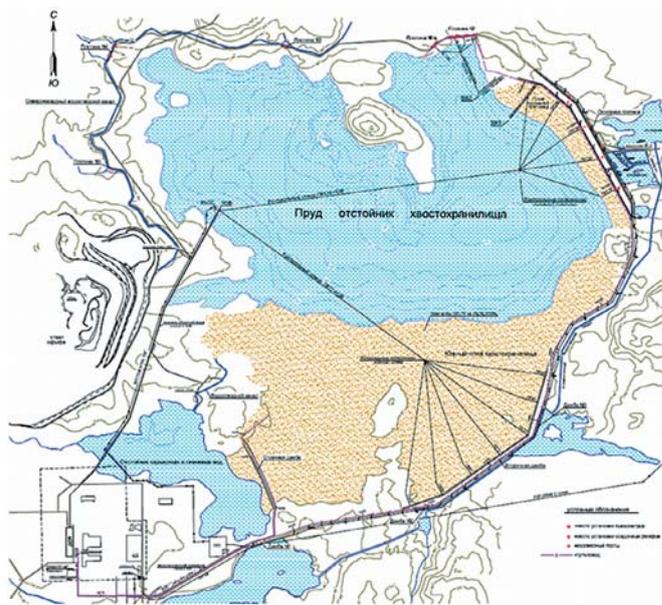
**Table 1**  
Volume of crude iron ore production and marketable products, in million tons

Железорудные компании	Год							
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Добыча руды, млн т								
АО «Олкон»	14,0	14,5	14,7	13,8	15,0	15,3	15,5	15,7
АО «Карельский окатыш»	34,6	34,6	34,9	34,7	34,7	34,2	34,9	35,8
Производство окатышей окисленных, млн т								
АО «Карельский окатыш»	10,0	10,4	10,5	10,8	11,3	11,3	11,5	11,6
Производство железорудных концентратов, млн т								
АО «Олкон»	4,3	4,1	4,3	4,1	4,7	4,8	4,6	4,5
АО «Карельский окатыш»	9,9	9,8	9,3	10,2	10,8	11,0	11,2	11,6



**Рис. 2**  
На смотровой площадке Центрального карьера Костомукшского месторождения. Вдали на заднем плане складированные вскрышные породы, представленные геллефлинтами (октябрь 2018 г.)

**Fig. 2**  
A view from the observation platform of the Central open pit of the Kostomuksha deposit. At a distance in the background there is dumped overburden, composed of haelleflinta (October 2018)



**Рис. 3**  
План хвостохранилища АО «Карельский окатыш»

**Fig. 3**  
Map of the 'Karelsky Okatysh' JSC tailings storage

лезнодорожном строительстве и обслуживании путей в Северо-Западном регионе. Сырьем для производства щебня являются вскрышные биотитовые гнейсы карьера АО «Олкон».

В то же время одной из наиболее актуальных проблем в работе горнодобывающих предприятий является организация складирования и хранения отходов добычи и переработки, которая осуществляется в форме создания хвостохранилищ. Существующие технологии не позволяют экономически обоснованно задействовать локализованные в них отходы, которые представляют значительную угрозу окружающей среде, выражающуюся как в перманентном попадании загрязняющих веществ в почву и водные системы, так и в угрозе возникновения чрезвычайных происшествий в результате одновременных аварий на сооружениях хвостохранилища.

Рассматривая пример АО «Карельский окатыш» в организации хвостохранилищ, следует привести краткую его характеристику. С севера и запада хвостохранилище околонушено холмами, с востока, юга и северо-востока – насыпными и намывными плотинами. По периметру хвостохранилища с южной и восточной сторон проложены распределительные пульпопроводы с рассредоточенными выпусками. По рельефу – овражно-балочного типа, по способу заполнения – намывные. Ёмкость хвостохранилища расположена на расстоянии 3 км к востоку от обогатительной фабрики АО «Карельский окатыш».

В состав комплекса, обеспечивающего складирование отходов обогащения железных руд и возврат осветленной воды из хвостохранилища в технологические процессы, входят следующие гидротехнические сооружения и системы: основная плотина; ограждающая дамба южного борта; плотины; отсекающая дамба; водосбросное сооружение; отстойник карьерных и сточных вод с водоотводным каналом; система водоотвода поверхностного стока; очистные сооружения; аварийный бассейн; комплекс сгущения хвостов; система гидротранспорта; система оборотного водоснабжения; система контрольно-измерительной аппаратуры (КИА).

**Модель расчета заполняемости отстойного пруда хвостохранилища в случае прорыва новой дамбы**

В рамках рассмотрения проблем развития хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш» нами построена модель расчета заполняемости отстойного пруда хвостохранилища в случае прорыва новой дамбы.

Для расчета модели используются данные из отчета «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.» АО «Механобр Инжиниринг». В рамках развития сооружений хвостового хозяйства выполняется организация строительства хвостохранилища на месте намывного пляжа. Одной из оценок принятия решений является оценка рисков, т.е. оценка аварийных ситуаций.

В Отчете «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.» представлены два сценария развития аварий на ГТС: потеря статической устойчивости дамбы, т.е. прорыв стенки дамбы в ходе нормальной эксплуатации (A1), и размыв тела дамбы в результате перелива воды через гребень, т.е. перелив воды через верх дамбы с последующим разрушением стенки (A2). Приведенные расчеты потока воды: «Максимальное значение скорости течения в проране будет достигать 4,97 м/с (сценарий A1) и 5,94 м/с (сценарий A2), при глубине потока 3,93 м (сценарий A1) и 5,97 м (сценарий A2), а максимальная ширина прорана достигнет 51,1 м (сценарий A1) и 70,9 м (сценарий A2)»<sup>2</sup>.

В результате оценки аварийной ситуации будет затоплена площадь в 2391–2790 га. Однако данные оценки приведены для варианта полностью построенной дамбы и без учета достаточно длительного процесса вытекания и возможностей накопления воды в отстойном пруде. В модели выполняется анализ возможности использования отстойного пруда и системы водосбросных сооружений в зависимости от степени постройки хвостохранилища.

<sup>2</sup> Отчет «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.». АО «Механобр Инжиниринг». С. 294. Режим доступа: [https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/151160/14pdrshhupkio\\_270120.pdf](https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/151160/14pdrshhupkio_270120.pdf) (дата обращения: 24.12.2021)

Для построения модели возьмем усредненные максимальные значения потока воды для модели: 51 м ширины x 4 м глубины x 5 м скорости. В результате получаем скорость воды на максимуме: 1020 м<sup>3</sup>/с. Для упрощения допустим:

– скорость воды линейно зависит от высоты дамбы и сохраняется на максимальном уровне;

– за период постройки (25 лет) высота дамб будет линейно увеличиваться;

– площадь нового хвостохранилища, а также объемы технической воды и высота бортов (максимальный объем воды) постоянны и не зависят от высоты дамб.

Первые 6 лет новое хвостохранилище незамкнуто и имеет

**Таблица 2**  
Оценка аварийной ситуации по годам в зависимости от уровня дамбы

**Table 2**  
Assessment of emergency situations by year depending on the dam level

**Уровень опасности селя по дамбе относительно текущего горизонта**

Срок, г	25					
Год	0	1	2	3	4	
Выход хвостов, млн т	23,05	22,91	22,85	22,78	22,78	
Объем хвостов, млн м <sup>3</sup>	15,9	15,80342733	15,76203905	15,71375271	15,71375271	
Слив в старое хранилище	1	1	1	1	1	
Макс высота дамбы З, м*	12,5	14,704	16,908	19,112	21,316	
Угол (крутизна склона)*	8,130102354	8,185798831	8,241479736	8,29714497	8,352794435	
Критический расход селя	80,73927738	79,25775109	77,77663903	76,2959438	74,81566804	
Коэффициент опасности	1	1,01869251	1,038091622	1,058238136	1,079176054	

**Расчет заполнения отстойного пруда в случае прорыва новой дамбы**

Скорость потока воды м <sup>3</sup> /с*						
Время выхода воды А1, ч						
Время выхода воды А2, ч						
Сброс воды* А1						
Сброс воды* А2						
Остаток воды А1)						
Остаток воды А2						
Наполнение отстойного пруда (ФПУ-НПУ) А1	13000000	0,77	0,74			
Наполнение отстойного пруда (ФПУ-НПУ) А2	13000000	1,63	1,58			

Продолжение таблицы

11	12	13	14	15	16	17
22,57	22,64	22,64	22,37	21,96	21,34	20,66
15,56889371	15,61718004	15,61718004	15,43093275	15,1481128	14,72043384	14,25136659
0	0	0	0	0	0	0
36,744	38,948	41,152	43,356	45,56	47,764	49,968
8,741890921	8,79741071	8,852913852	8,908400251	8,963869809	9,019322431	9,074758021
64,46570151	62,98887511	61,51249153	60,03655333	58,56106307	57,08602333	55,61143664
1,252437738	1,281802179	1,312567177	1,34483532	1,378719462	1,414344049	1,451846639
448,8	489,6	530,4	571,2	612	652,8	693,6
6,189344425	5,673565723	5,23713759	4,863056334	4,538852578	4,255174292	4,004869922
13,24519707	12,14143065	11,20747444	10,40694055	9,713144517	9,106072985	8,570421633
222816,3993	204248,366	188536,9532	175070,028	163398,6928	153186,2745	144175,3172
476827,0945	437091,5033	403469,0799	374649,8599	349673,2026	327818,6275	308535,1788
9777183,601	9795751,634	9811463,047	9824929,972	9836601,307	9846813,725	9855824,683
20923172,91	20962908,5	20996530,92	21025350,14	21050326,8	21072181,37	21091464,82
232816,3993	214248,366	198536,9532	185070,028	173398,6928	163186,2745	154175,3172
266827,0945	227091,5033	193469,0799	164649,8599	139673,2026	117818,6275	98535,17878

Примечание. \* По данным Отчета «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.». АО «Механобр Инжиниринг». Режим доступа: [https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupkio\\_270120.pdf](https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupkio_270120.pdf) (дата обращения: 24.12.2021)

свободный выход в отстойный пруд (строка 9, табл. 2).

В 16-й строке таблицы представлена скорость воды относительно высоты дамбы, рассчитанная по формуле:

$$y = ax + b, \text{ где } x - \text{«год постройки» (строка 6).}$$

В Отчете «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.» для варианта А1 указан слив 10 млн м³ воды, а для вариан-

та А2 – 21,4 млн м³ воды³. Объемами неконсолидированных хвостовых отложений пренебрегаем. В строке 16 и 17 представлены расчеты времени вытекания воды из прорыва.

Старое хвостохранилище оборудовано системой водосбросных сооружений с максимальной производительностью

3 Отчет «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.». АО «Механобр Инжиниринг». С. 295. Режим доступа: [https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupki0\\_270120.pdf](https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupki0_270120.pdf) (дата обращения: 24.12.2021)

	5	6	7	8	9	10
	22,78	22,78	22,78	22,71	22,71	22,71
	15,71375271	15,71375271	15,71375271	15,66546638	15,66546638	15,66546638
	1	0	0	0	0	0
	23,52	25,724	27,928	30,132	32,336	34,54
	8,408428032	8,464045664	8,519647232	8,57523264	8,630801789	8,686354581
	73,33581435	71,85638534	70,37738362	68,89881178	67,42067242	65,94296814
	1,100952899	1,123620079	1,14723329	1,171852972	1,197544825	1,224380395

		244,8	285,6	326,4	367,2	408
		11,34713145	9,726112667	8,510348584	7,564754297	6,808278867
		24,28286129	20,81388111	18,21214597	16,1885742	14,56971678
		408496,732	350140,056	306372,549	272331,1547	245098,0392
		874183,0065	749299,7199	655637,2549	582788,671	524509,8039
		9591503,268	9649859,944	9693627,451	9727668,845	9754901,961
		20525816,99	20650700,28	20744362,75	20817211,33	20875490,2
	28496,73203	418496,732	360140,056	316372,549	282331,1547	255098,0392
	14183,00654	664183,0065	539299,7199	445637,2549	372788,671	314509,8039

	18	19	20	21	22	23	24
	20,79	20,86	18,26	17,92	17,92	17,92	16,96
	14,34104121	14,38932755	12,59583514	12,36130152	12,36130152	12,36130152	11,69908894
	0	0	0	0	0	0	0
	52,172	54,376	56,58	58,784	60,988	63,192	65,396
	9,130176482	9,185577719	9,240961637	9,29632814	9,351677132	9,40700852	9,462322208
	54,13730557	52,66363266	51,19042045	49,71767148	48,24538828	46,77357336	45,30222927
	1,491379679	1,533112573	1,577234113	1,623955326	1,673512853	1,726172956	1,782236298
	734,4	775,2	816	856,8	897,6	938,4	979,2
	3,782377148	3,583304667	3,404139434	3,242037556	3,094672212	2,960121247	2,836782861
	8,094287098	7,668271987	7,284858388	6,937960369	6,622598534	6,334659468	6,070715323
	136165,5773	128998,968	122549,0196	116713,352	111408,1996	106564,3649	102124,183
	291394,3355	276057,7915	262254,902	249766,5733	238413,5472	228047,7408	218545,7516
	9863834,423	9871001,032	9877450,98	9883286,648	9888591,8	9893435,635	9897875,817
	21108605,66	21123942,21	21137745,1	21150233,43	21161586,45	21171952,26	21181454,25
	146165,5773	138998,968	132549,0196	126713,352	121408,1996	116564,3649	112124,183
	81394,33551	66057,79154	52254,90196	39766,5733	28413,54724	18047,74084	8545,751634

стью 36000 м<sup>3</sup>/ч<sup>4</sup>. В строках 20 и 21 представлены расчеты объема сброшенной воды во время аварии.

Остальная вода попадает в старое хвостохранилище, т.е. в отстойный пруд. «Общий объем отстойного пруда (при ФПУ) – около 165 млн м<sup>3</sup>, фактический объем (при НПУ) – около 152 млн м<sup>3</sup>»<sup>5</sup>. Соответственно, при текущем размере отстойного пруда в него вмещается около 13 млн м<sup>3</sup> воды. В рамках модели выполним оценку вместимости вытекшей воды в отстойный пруд. В результате получаем коэффициент заполненности аварийной водой 0,74 (на 6-й год) – 0,77 (на 25-й год) для А1 и 1,58–1,63 для А2 (столбцы 25 и 26). Это означает, что для локализации техногенной аварии А1 требуется обеспечение не менее 74–77% свободного объема отстойного пруда, а для локализации техногенной аварии А2 требуется увеличение свободного объема отстойного пруда в 1,58–1,63 раза.

**Заключение**

Техногенные происшествия, связанные с нарушением штатного режима работы гидротехнических сооружений на добывающих предприятиях, происходят все чаще в мировом масштабе. Особенно велика их угроза в регионах с экстремальными и суровыми природными условиями, к которым можно отнести Север России. Расчет сценариев возможных аварийных ситуаций здесь должен проводить-

ся особенно тщательно, а выявленные угрозы и уязвимости приниматься во внимание при проектировании перспективного развития хвостовых хозяйств. АО «Карельский окатыш» является значимым предприятием в области добычи и обогащения железной руды. В настоящее время на нем осуществляется модернизация производственного процесса, призванная в частности продлить временной горизонт эксплуатации месторождений, что в то же время увеличит объемы накапливаемых отходов производства и потребует модернизации и развития хвостового хозяйства на перспективный период до 2043 г. В рамках данной работы было выявлено, что существует уязвимость планируемых сооружений хвостового хозяйства в двух сценариях развития аварийных ситуаций, рассматриваемых на основе официального отчета «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 годов»:

1. Потеря статической устойчивости дамбы, т.е. прорыв стенки дамбы в ходе нормальной эксплуатации с объемами слива 10 млн м<sup>3</sup> воды, потребует для локализации техногенной аварии обеспечения не менее 74–77% свободного объема отстойного пруда.

2. Размыв тела дамбы в результате перелива воды через гребень, т.е. перелив воды через верх дамбы с последующим разрушением стенки с объемами слива 21,4 млн м<sup>3</sup> воды, для предотвращения которого требуется увеличение свободного объема отстойного пруда в 1,58–1,63 раза.

Выявленные в результате проработки этих сценариев уязвимости в организации гидротехнических сооружений следует учесть в планируемых мероприятиях по развитию сооружений хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш».

4 Отчет «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.». АО «Механобр Инжиниринг». С. 33. Режим доступа: [https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupkio\\_270120.pdf](https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupkio_270120.pdf) (дата обращения: 24.12.2021)

5 Отчет «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКИО АО «Карельский окатыш» на период 2018–2043 гг.». АО «Механобр Инжиниринг». С. 31. Режим доступа: [https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupkio\\_270120.pdf](https://www.kostomuksha-city.ru/attachments/article/15160/14pdrshhupkio_270120.pdf) (дата обращения: 24.12.2021)

**Список литературы**

1. Tuck C.C. Iron ore. In: 2018 *Minerals Yearbook*. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2021. 11 p. Available at: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2018/myb1-2018-iron-ore.pdf>
2. Carmo F.F.D., Kamino L.H.Y., Junior R.T., Campos I.C.D., Carmo F.F.D., Silvino G., Castro K.J.D.S.X.D., Mauro M.L., Rodrigues N.U.A., Miranda M.P.D.S., Pinto C.E.F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017;15(3):145–151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
3. Longhini C.M., Rodrigues S.K., Costa E.S., da Silva C.A., Cagnin R.C., Gripp M., Lehrback B.D., Mill G.N., de Oliveira E.M.C., Hermogenes C.D.C.M., Rodrigues D.G.F., David A.M., Gramlich K.C., Bisi Júnior R.D.C., Gomes A.A.P., da Silva Filho J.P., Almeida J.F., de Souza K.F., Luz Junior W.A.R., Poleze L.M.B., Barros R.R., Rigo D., Ghisolfi R.D., Neto R.R., Sá F. Environmental quality assessment in a marine coastal area impacted by mining tailing using a geochemical multi-index and physical approach. *Science of The Total Environment*. 2022;803:149883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149883>
4. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*. 2014;51:229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
5. Owen J.R., Kemp D., Lèbre É., Svobodova K., Pérez Murillo G. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020;42:101361. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101361>
6. Rana N.M., Ghahramani N., Evans S.G., McDougall S., Small A., Take W.A. Catastrophic mass flows resulting from tailings impoundment failures. *Engineering Geology*. 2021;292:106262. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106262>
7. Islam K., Murakami S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*. 2021;70:102361. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>
8. Ковлеков И.И. Безопасность гидротехнических сооружений при эксплуатации месторождений на Севере. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(7):154–164. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_7\\_0\\_154](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_154)
9. Elias S.A. Human impacts on Arctic ecosystems. In Goldstein M.I., DellaSala D.A. (Eds). *Encyclopedia of the World's Biomes*. Amsterdam: Elsevier; 2020. P. 409–420. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12032-9>
10. Tolvanen A., Eilu P., Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä J. Mining in the Arctic environment – A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives. *Journal of Environmental Management*. 2018;233:832–844. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.124>
11. Громцев А.Н., Кузнецов О.Л., Шкиперова Г.Т. (ред.) *Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 г.* Петрозаводск; 2020.
12. Опалев А.С., Хохуля М.С., Бирюков В.В. Энерго-ресурсосберегающая технология получения магнетит-гематитового концентрата из железистых кварцитов группы месторождений Заимандровского района. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2014;(2):67–73.
13. Опалев А.С., Хохуля М.С., Фомин А.В., Карпов И.В. Создание инновационных технологий производства высококачественного железорудного концентрата на предприятиях Северо-Запада России. *Горный журнал*. 2019;(6):56–61. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.07>
14. Помельников И.И. Состояние и перспективы развития железорудной промышленности при устойчивом снижении мировых цен на железорудное сырье. *Горный журнал*. 2015;(7):78–88. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.11>

15. Соколов В.А. (ред.). *Вскрышные породы Костомукшского железорудного месторождения и пути их использования в народном хозяйстве*. Петрозаводск; 1983. 142 с.
16. Горьковец В.Я., Шаров Н.В. (ред.). *Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минералогия)*. Петрозаводск: КарНЦ РАН; 2015. 322 с.

### References

1. Tuck C.C. Iron ore. In: 2018 *Minerals Yearbook*. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2021. 11 p. Available at: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2018/myb1-2018-iron-ore.pdf>
2. Carmo F.F.D., Kamino L.H.Y., Junior R.T., Campos I.C.D., Carmo F.F.D., Silvino G., Castro K.J.D.S.X.D., Mauro M.L., Rodrigues N.U.A., Miranda M.P.D.S., Pinto C.E.F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017;15(3):145–151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
3. Longhini C.M., Rodrigues S.K., Costa E.S., da Silva C.A., Cagnin R.C., Gripp M., Lehrback B.D., Mill G.N., de Oliveira E.M.C., Hermogenes C.D.C.M., Rodrigues D.G.F., David A.M., Gramlich K.C., Bisi Júnior R.D.C., Gomes A.A.P., da Silva Filho J.P., Almeida J.F., de Souza K.F., Luz Junior W.A.R., Poleze L.M.B., Barros R.R., Rigo D., Ghisolfi R.D., Neto R.R., Sá F. Environmental quality assessment in a marine coastal area impacted by mining tailing using a geochemical multi-index and physical approach. *Science of The Total Environment*. 2022;803:149883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149883>
4. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*. 2014;51:229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
5. Owen J.R., Kemp D., Lèbre É., Svobodova K., Pérez Murillo G. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020;42:101361. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101361>
6. Rana N.M., Ghahramani N., Evans S.G., McDougall S., Small A., Take W.A. Catastrophic mass flows resulting from tailings impoundment failures. *Engineering Geology*. 2021;292:106262. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106262>
7. Islam K., Murakami S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*. 2021;70:102361. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>
8. Kovlekov I.I. Safety of hydraulic structures in mining in the North. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(7):154–164. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_7\\_0\\_154](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_154)
9. Elias S.A. Human impacts on Arctic ecosystems. In Goldstein M.I., DellaSala D.A. (eds). *Encyclopedia of the World's Biomes*. Amsterdam: Elsevier; 2020. P. 409–420. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12032-9>
10. Tolvanen A., Eilu P., Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markkovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä J. Mining in the Arctic environment – A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives. *Journal of Environmental Management*. 2018;233:832–844. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.124>
11. Gromtsev A.N., Kuznetsov O.L., Shkiperova G.T. (eds). *State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2019*. Petrozavodsk; 2020.
12. Opalev A.S., Khokhulya M.S., Biryukov V.V. Energy-resource-saving technology for obtaining magnetite-hematite concentrate from ferruginous quartzites of the Zaimandrovsky district group of deposits. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2014;(2):67–73. (In Russ.)
13. Opalev A.S., Khokhulya M.S., Fomin A.V., Karpov I.V. Creation of innovative technologies for production of high-quality iron concentrate production in the North West of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):56–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.07>
14. Pomelnikov I.I. State and prospects of iron-ore industry development with stable decrease of global iron ore prices. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(7):78–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.11>
15. Sokolov V.A. (ed.). *Overburden rocks of the Kostomuksha iron ore deposit and ways of their use in the national economy*. Petrozavodsk; 1983. 142 p. (In Russ.)
16. Gorkovets V.Ya., Sharova N.V. (eds). 2. *Kostomuksha ore district (geology, deep structure and mineralogy)*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS; 2015. 322 p. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Тишков Сергей Вячеславович** – кандидат экономических наук, ученый секретарь, Институт экономики Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6061-4165>, e-mail: [insteco\\_85@mail.ru](mailto:insteco_85@mail.ru)

**Волков Александр Дмитриевич** – младший научный сотрудник, Институт экономики Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0451-8483>, e-mail: [kov8vol@gmail.com](mailto:kov8vol@gmail.com)

**Кулаков Кирилл Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0305-419X>, e-mail: [kulakov@cs.karelia.ru](mailto:kulakov@cs.karelia.ru)

**Щипцов Владимир Владимирович** – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7005-3253>, e-mail: [vv.shchiptsov@gmail.com](mailto:vv.shchiptsov@gmail.com)

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.02.2022

Поступила после рецензирования: 15.03.2022

Принята к публикации: 16.03.2022

### Information about the authors

**Sergey V. Tishkov** – Cand. Sci. (Econ.) Academic Secretary, Institute of Economics, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6061-4165>, e-mail: [insteco\\_85@mail.ru](mailto:insteco_85@mail.ru)

**Alexander D. Volkov** – Junior Research Scientist, Institute of Economics, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0451-8483>, e-mail: [kov8vol@gmail.com](mailto:kov8vol@gmail.com)

**Kirill A. Kulakov** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0305-419X>, e-mail: [kulakov@cs.karelia.ru](mailto:kulakov@cs.karelia.ru)

**Vladimir V. Shchiptsov** – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Research Scientist, Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7005-3253>, e-mail: [vv.shchiptsov@gmail.com](mailto:vv.shchiptsov@gmail.com)

### Article info

Received: 21.02.2022

Revised: 15.03.2022

Accepted: 16.03.2022